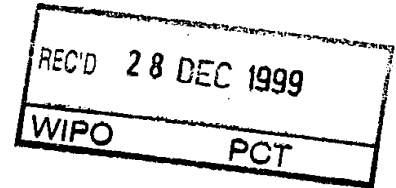


BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

**PRIORITY
DOCUMENT**SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)**Bescheinigung**

E U

DE 99 / 3204

Die Daimler-Benz Aktiengesellschaft in Stuttgart/Deutschland hat eine Patentanmeldung unter der Bezeichnung

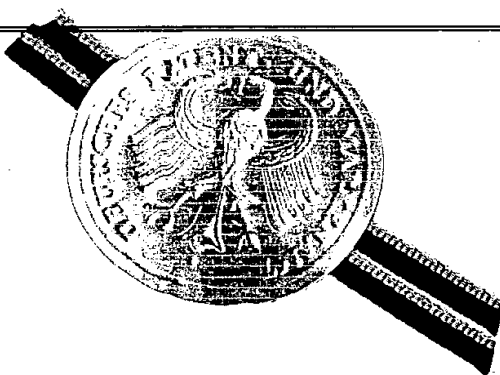
"Kombiniertes Erd-Sternsensormsystem und Verfahren zur Bahn- und Lagebestimmung von Raumflugkörpern"

am 9. Oktober 1998 beim Deutschen Patent- und Markenamt eingereicht.

Die Anmeldung ist auf die DaimlerChrysler AG in Stuttgart/Deutschland umgeschrieben worden.

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

Die Anmeldung hat im Deutschen Patent- und Markenamt vorläufig das Symbol G 05 D 1/08 der Internationalen Patentklassifikation erhalten.



München, den 19. November 1999

Deutsches Patent- und Markenamt

Wehner

Der Präsident

Im Auftrag

Aktezeichen: 198 46 690.0

Kombiniertes Erd-Sternsensormesssystem und Verfahren zur Bahn- und Lagebestimmung von Raumflugkörpern

Die Erfindung betrifft ein kombiniertes Erd-Sternsensormesssystem zur dreiachsigen Lagebestimmung von Satelliten im Weltraum, sowie ein Verfahren zur Bahn- und Lagebestimmung von Raumflugkörpern.

Bisher werden für Satelliten mit Erdorientierung Infrarotsensoren zur Bestimmung von Roll- und Nickwinkel und Sonnensensoren zur Bestimmung des Gierwinkels des Satelliten verwendet. Nachteile dieser Lösung sind der hohe Aufwand durch die Verwendung einer Anordnung mehrerer Sonnensensorköpfe, sowie der Wegfall der Gierreferenz bei Ko-Linearität von Erde und Sonne. Darüber hinaus ist zur Auswertung zusätzlich die genaue Kenntnis der Position des Satelliten auf seiner Umlaufbahn erforderlich. Weiterhin beeinflussen Fehler zwischen den Meßachsen von Sonnen- und Erdsensoren, die z. B. durch Ungenauigkeiten beim Einbau oder durch thermische Beeinflussung verursacht werden, erheblich die Qualität der Messung.

Bekannte Sternsensoren liefern eine Drei-Achsen-Lagereferenz in einem Inertialsystem. Zur Erdausrichtung ist auch hier die genaue Kenntnis der Satellitenposition erforderlich. Für derartige Sternsensoren werden heute CCDs verwendet. Wegen ihrer mangelnden Strahlungsfestigkeit ist ihre Verwendung in Bahnen mit hoher Strahlungsbelastung, z. B. für geosynchrone Missionen, nicht geeignet.

Aus der EP 0 589 387 A1 ist ein kombiniertes Erd-Sternsensoren-system bekannt, das über eine einzige Optik sowohl die Stern- als auch die Erdbeobachtung im UV-Bereich ausführt. Zur Durchführung der gemeinsamen Beobachtung ist die Optik als ein Weitwinkel-System mit einem Spiegelsystem ausgebildet. Mit dem bekannten System können wegen den übereinstimmenden Beobachtungsrichtungen bei der Erd- und bei der Sternbeobachtung nur erdnahe Sterne und wegen der gleichzeitigen Auslegung des Sensors auf die starke Erdstrahlung nur Sterne mit hoher Intensität zur Lagebestimmung beobachtet werden.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein kombiniertes Erd-Sternsensoren-system zu schaffen, das bezüglich der Auswahl der geeigneten zu beobachtenden Sterne nicht eingeschränkt und kostengünstig herstellbar ist. Weiterhin soll ein Verfahren zur Bahn- und Lagebestimmung eines Raumflugkörpers angegeben werden, das eine erhöhte Genauigkeit aufweist und Bordautonomie ermöglicht.

Diese Aufgabe wird gelöst durch das kombinierte Erd-Sternsensoren-system gemäß Patentanspruch 1 und das Verfahren gemäß Patentanspruch 6. Weitere vorteilhafte Merkmale, Aspekte und Details der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen, der Beschreibung und den Zeichnungen.

Das erfindungsgemäße kombinierte Erd-Sternsensoren-system zur dreiachsigen Lagebestimmung von Satelliten im Weltraum hat getrennte Aperturen mit unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen und gemeinsame Bildaufnehmer für den Erd- und den Sternsensor.

Durch die erfindungsgemäße Beobachtung der Erde und Sterne mit verschiedenen Aperturen können auch Sterne der Magnitude 5 bei der

Beobachtung berücksichtigt werden. Der erhebliche Intensitätsunterschied dieser Sterne zur Erdstrahlung kann durch eine unterschiedliche Gestaltung der Apertur und Filterung aufgefangen werden. Trotz gleichzeitiger Beobachtung der Erde wird bei Verwendung von zwei Aperturen die Detektion der Sterne nicht durch das Streulicht der Erde beeinflusst. Der einfache Aufbau des erfindungsgemäßen Systems läßt hohe Lichtstärken bei geringen Kosten zu. Eine hohe Lichtstärke gestattet die Verwendung kostengünstiger CMOS-Bildaufnehmer.

Die CMOS-Bildaufnehmer bilden bevorzugt ein CMOS-Focal Plane Array als Fokalebenensensor mit einem Dynamikbereich von bis zu $1:10^6$. Er erlaubt eine variable Steuerung der Belichtungszeit, so daß die Integration auf die unterschiedlichen Helligkeiten von Sternen und Erde angepaßt werden kann.

Durch eine alternativ vorgeschlagene Verwendung von zwei verschiedenen Optiken statt einer gemeinsamen Optik können die zur Detektion verwendeten Wellenlängenbereiche unabhängig voneinander optimiert werden.

Das erfindungsgemäße, integrierte Sensorensystem ermöglicht die Bestimmung von drei Lagewinkeln, drei Winkelgeschwindigkeiten und der Position des Raumflugkörpers. Durch Softwaresteuerung können verschiedene Bahnen wie geosynchrone Bahnen, Transferbahnen, sowie niedrige, mittlere und elliptische Bahnen abgedeckt werden.


Der Sensor erlaubt ferner eine variable Steuerung der Belichtungszeit, so daß die Integration auf die unterschiedlichen Helligkeiten von Sternen und Erde angepaßt werden kann. Vorzugsweise wird abwechselnd immer ein Frame lang und ein Frame kurz belichtet.

Das erfindungsgemäße Verfahren umfaßt die Schritte:

Gleichzeitiges Abbilden von Sternen und Erdrand in einer Fokalebene eines Sensorsystems; Bestimmen der Sternposition in der Fokalebene ; Bestimmen des Erdrandes durch Bildverarbeitung; Bestimmen von Drehraten des Sensorsystems aus der Bewegung des Sternenbildes in der Fokalebene; und Berechnen von Bahn und/oder Lage eines Raumflugkörpers, der das Sensorsystem trägt.

Mit der Vorrichtung und dem Verfahren können Bahn und Lage des Raumflugkörpers bzw. Satelliten gleichzeitig mit hoher Genauigkeit erhalten werden.

Durch wechselweise Anpassung der Belichtungs- bzw. Integrationszeit des Sensors bzw. der Bildaufnehmer an die Helligkeit der Sterne und die Helligkeit der Erde können auch Sterne geringer Helligkeit gleichzeitig mit dem Erdrand erfaßt werden. Durch Herausfiltern bzw. Erfassen eines langwelligen Anteils der Strahlung, z. B. mittels Kantenfiltern, wird erreicht, daß der Erdrand besonders gut und stabil erfaßt werden kann. Durch modellbasiertes Tracking des Erdrandes können zusätzliche Freiheitsgrade ermittelt werden.



Weitere Vorteile der Erfindung sind eine geringere Masse bzw. eine mögliche Redundanz, da weitere Geräte, wie beispielsweise Kreisel, die bisher zur Bahn- und Lagebestimmung notwendig waren, eingespart werden können. Es ergibt sich eine vereinfachte Integration und eine inhärente Strahlungsresistenz. Die Bahnbestimmung ist ohne GPS möglich, insbesondere auch für erdnahe und geostationäre Satelliten. Dadurch kann Bordautonomie erreicht werden.

Anhand der Zeichnung werden Ausführungsbeispiele der Erfindung näher erläutert.

- | | |
|---------|---|
| Figur 1 | zeigt ein kombiniertes Erd-Sternsensormsystem mit einer gemeinsamen Optik, |
| Figur 2 | zeigt ein kombiniertes Erd-Sternsensormsystem mit zwei Optiken, |
| Figur 3 | zeigt eine Anordnung von Bildaufnehmern, und |
| Figur 4 | zeigt ein Koordinatensystem, dessen Z-Achse zum Erdmittelpunkt gerichtet ist und dessen X-Achse in Richtung der Bahnbewegung zeigt. |
-

Das in Figur 1 gezeigte kombinierte Erd-Sternsensormsystem 1 besteht aus einer gemeinsamen Optik 2, einem Ablenkspiegel 3, Bildaufnehmern 4 und den Fenstern 6 und 7 zur Erd- und Sternenbeobachtung.

Das gezeigte System ist insbesondere dadurch gekennzeichnet, daß die Beobachtungsrichtungen zur Erde und zu den Sternen verschieden sind.

Das Sternenlicht gelangt durch das Fenster 6 vorbei an dem kleinen Ablenkspiegel 3 auf die gemeinsame Optik 2 und wird auf die Bildaufnehmer 4 fokussiert. Das Erdlicht gelangt durch das Fenster 7 auf den Ablenkspiegel 3, der es auf die gemeinsame Optik 2 lenkt. Von der gemeinsamen Optik 2 wird es auf die Bildaufnehmer 4 fokussiert. Die Bildaufnehmer 4 sind in Bezug auf die gemeinsame Optik 2 in einer gemeinsamen Fokalebene nach einem bestimmten Muster angeordnet. Figur 3 zeigt beispielsweise eine mögliche Anordnung von vier Bildaufnehmern, mit der die Abdeckung eines großen Sehfeldes mit einer minimalen Anzahl von Bildpunkten gegeben ist. Als Bildaufnehmer können beispielsweise die bekannten CCD-Bauelemente Verwendung finden, es sind aber auch andere Bauelemente, wie z. B. CMOS-Bildaufnehmer einsetzbar.

Bei der Apertur für die Erdbeobachtung handelt es sich um eine kleine Apertur, die vorteilhaft störendes Streulicht der Erde während der Beobachtung von schwach leuchtenden Sternen vermeidet sowie intensives Sonnenlicht dämpft, das manchmal auftritt, wenn die Sonne im Strahlengang zur Erde auftaucht. Das Bild der Erde durch das Fenster 7 und die Bilder der Sterne durch Fenster 8 überlagern sich auf den Bildaufnehmern.

Das Auswertesystem des kombinierten Erd-Stersensorsystemes 1 kann die Trennung von Erd- und Sternbild z. B. in folgender Weise vornehmen: der Erdrand im Bild wird grob, d.h. nicht subpixelgenau bestimmt, dann wird das Bild der Sterne, die deutlich außerhalb der Erdscheibe liegen, ausgewertet; die Sterne werden dazu mit der Sternenkarte verglichen; in der Sternenkarte werden die Sterne bestimmt, deren Bild zu nahe am Erdrand liegt, z. B. bis 3 Pixel, und die daher eine genaue Lokalisierung stören würden; der Erdrand wird dann subpixelgenau lokalisiert, wobei Pixel nicht berücksichtigt werden, die zu nahe an störenden Sternen liegen.

Ist der Unterschied der Aperturen groß genug, so stören die Sterne nicht, die durch die Erdapertur beobachtbar sind; ihr Licht wird von der kleineren Apertur zu stark gedämpft. Sonne und Mond müssen allerdings berücksichtigt werden, lassen sich aber durch ihre Flächenausdehnung auf einfache Weise von Sternen unterscheiden.

Alternativ zu dem System mit einer gemeinsamen Optik zeigt Figur 2 ein System mit getrennten Optiken für die Erd- und Sternbeobachtung. Das kombinierte Erd-Sternsensormsystem 1 besteht in diesem Fall aus einem halbdurchlässigen Strahlteiler 8, einer Optik 9 für die Sternbeobachtung, einer Optik 10 mit ggf.

einem vorgeschaltetem Ablenkspiegel 11 für die Erdbeobachtung, aus den Fenstern 6 und 7, sowie aus den Bildaufnehmern 4.

Die Optik 10 für die Erdbeobachtung ist direkt im Fenster 7 eingesetzt und bildet die - ggf. über einen äußeren Ablenkspiegel 11 - empfangene Erdstrahlung über den halbdurchlässigen Strahlteiler 8 auf den Bildaufnehmern 4 ab. Die Optik 9

bildet das durch das Fenster 6 empfangene Sternenlicht über den Strahlteiler 8 auf die Bildaufnehmer 4 ab. Figur 2 zeigt die Bildaufnehmer 4 in einer gemeinsamen Fokalebene zum Strahlteiler 8. Die beiden Sensoren können bezüglich ihrer optischen Merkmale zur Kompensation von Intensitätsunterschieden aber auch für unterschiedliche Brennweiten ausgelegt sein und zusätzliche Dämpfungsfilter im Strahlengang aufweisen.

Wie im zu Figur 1 beschriebenen System ist die Apertur für die Erdbeobachtung gedämpft und kleiner als die Apertur für die Sternenbeobachtung, und die Beobachtungsrichtungen zur Erde und zu den Sternen sind verschieden.

Auch durch geeignete Steuerung der Belichtungs- bzw. Integrationszeit kann die unterschiedliche Helligkeit von Sternen und Erde ausgeglichen werden. Dazu wird im Betrieb abwechselnd ein Frame lang und ein Frame kurz belichtet. Mit dem ~~jeweiligen Frame mit relativ langer Belichtungszeit, z. B. 0,1 sec., werden die~~
Sterne optimal erfaßt, während mit dem darauffolgenden Frame mit relativ kurzer Belichtungszeit, z. B. 0,0001 sec., der Erdrand besonders genau erfaßt wird.

Zunächst wird die Sternposition in der Bildebene bestimmt. Anschließend erhält man durch Tracking der erfaßten Sterne die

Bewegungen $(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt})^T$ der Sterne in der Bildebene. Danach werden die Drehraten $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ durch Lösen zum Beispiel folgender Gleichungen bestimmt:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{xy}{f} \omega_x + (-f - \frac{x^2}{f}) \omega_y + y \omega_z$$

$$\frac{dy}{dt} = (f + \frac{y^2}{f}) \omega_x - \frac{xy}{f} \omega_y - x \omega_z, \quad (1)$$

wobei f die Brennweite des optischen Systems ist. Die Rotationsfreiheitsgrade des Raumflugkörpers können durch Verfolgen von mindestens 2 Sternen (x_i, y_i) in der Bildebene bestimmt werden.

Zur Veranschaulichung der Gleichungen ist in Figur 4 die Bildebene x, y und ein Koordinatensystem gezeigt, wobei sich der Satellit in X -Richtung fortbewegt und die Z -Achse zum Erdmittelpunkt zeigt. Die Drehraten $\omega_x, \omega_y, \omega_z$, geben das Rollen, das Nicken und das Gieren des Satelliten bzw. Raumflugkörpers wieder.

Im nächsten Schritt wird der Erdrand subpixelgenau - nach entsprechender Segmentierung - bestimmt. Dazu wird ein bahnabhängiges Modell der Erde und der Erdatmosphäre an die Intensitätsverteilung in der Bildebene angefitet. Dabei ist zu berücksichtigen, daß das Bild zur subpixelgenauen Sternpositionsbestimmung bereits defokussiert ist (über 2-3 Pixel). Bei der subpixelgenauen Bestimmung erfolgt eine Interpolation zwischen den einzelnen Pixelwerten. Durch die Segmentierung, d. h. durch die Trennung des Bildes nach Erde und Stern, wird eine höhere Genauigkeit erzielt.

Falls die Erde als Ganzes oder als genügend gekrümmtes Kreissegment abgebildet wird, kann der Vektor zum Erdmittelpunkt geschätzt werden.

Nun wird mittels folgender Formel die Bahnbewegung $(v_x, v_y, v_z)^T$ des Satelliten aus der Bildbewegung des Erdrandes $(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt})^T$ ermittelt:

$$\frac{dx}{dt} = f/Z^* (-v_x + x v_z) + C_x$$

$$\frac{dy}{dt} = f/Z^* (v_y + y v_z) + C_y \quad (2)$$

Hierbei ist Z die in diesem Fall konstante Entfernung zum Erdhorizont. C_x, C_y sind Konstanten, die von den bekannten Drehraten wie folgt abhängen:

$$C_x = \frac{xy}{f} \omega_x + \left(-f - \frac{x^2}{f}\right) \omega_y + y \omega_z$$

$$C_y = \left(f + \frac{y^2}{f}\right) \omega_x - \frac{xy}{f} \omega_y - x \omega_z. \quad (3)$$

Wieder genügen zwei Punkte $(x, y)^T$ des Erdrandes, um die Bahnkomponenten zu schätzen. Falls Z unbekannt ist, können die Geschwindigkeiten nur bis auf einen konstanten Faktor bestimmt werden. Bildet sich der Erdrand nur als lineares oder quasilineares Element ab, so enthält (2) nur eine Messung für die Unbekannten v_x, v_y, v_z .

Eine gleichzeitige Bahn- und Lagebestimmung kann also z. B. durch folgende Schritte erfolgen:

- a) Bestimmung der Sternposition in der Fokalebene mittels einem subpixelgenauen Verfahren wie z. B. Centroiding;
 - b) Bestimmung der Drehraten durch Tracking der Flächenschwerpunkte der Sterne und Invertieren der Abbildungsgleichungen;
 - c) Bestimmung des Erdrandes durch modellgestützte subpixelgenaue Bildverarbeitungsverfahren;
 - d) Schätzen des Erdmittelpunktes aus dem Bild des Erdrandes, soweit möglich;
 - e) Modellbasiertes Tracking des Erdrandes, um zusätzliche Freiheitsgrade zu gewinnen
-

Patentansprüche

1. Kombiniertes Erd-Sternsensormsystem zur dreiachsigen Lagebestimmung von Satelliten im Weltraum, **dadurch gekennzeichnet**, daß das kombinierte Erd-Sternsensormsystem (1) getrennte Aperturen mit unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen und gemeinsame Bildaufnehmer (4) für den Erd- und den Sternsensor aufweist.
2. Sensormsystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Erd-Sternsensormsystem (1) eine gemeinsame Optik (2) für die Erd- und Sternbeobachtung und einen Ablenkspiegel (3) zur Umlenkung des seitlich eintretenden Erdlichtes auf die gemeinsame Optik (2) aufweist.
3. Sensormsystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Erd-Sternsensormsystem (1) eine Optik (9) für die Sternbeobachtung, eine Optik (10) für die Erdbeobachtung und einen halbdurchlässigen Strahlenteiler (8) zur Umlenkung des seitlich eintretenden Erdlichtes und Transferierung des in Längsrichtung eintretenden Sternenlichtes auf die Bildaufnehmer (4) aufweist.

4. Sensorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Apertur für das Erdlicht erheblich kleiner ist als die Apertur für das Sternenlicht.

5. Sensorsystem nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß das Auswertesystem des Sensorsystems mit Hilfe eines Sternkatalogs oder ähnlichem Vorwissen diejenigen Stellen im Bild außer acht läßt, an denen sich das Bild des Erdrandes mit Bildern von Sternen überlagert und damit Störeinflüsse auf die Genauigkeit der Erdrandbestimmung im Bild eliminiert.

6. Verfahren zur gleichzeitigen Bahn- und Lagebestimmung eines Raumflugkörpers, gekennzeichnet durch die Schritte:

- Gleichzeitiges Abbilden von Sternen und Erdrand in einer Fokalebene eines Sensorsystems;
- Bestimmen der Sternposition in der Fokalebene;
- Bestimmen des Erdrandes durch Bildverarbeitung;
- Bestimmen von Drehraten des Sensorsystems aus der Bewegung des Sternbildes in der Fokalebene;
- Berechnen von Bahn und/oder Lage eines Raumflugkörpers, der das Sensorsystem trägt.

7. Verfahren nach Anspruch 6, weiterhin gekennzeichnet durch modellbasiertes Tracking des Erdrandes.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß ein langwelliger Teil der Strahlung herausgefiltert und zur Bestimmung des Erdrandes verwendet wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Erdrand durch Anfitten von Erdmodellen bestimmt wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Belichtung- oder Integrationszeit wechselweise an die unterschiedlichen Helligkeiten von Sternen und Erde angepaßt wird.

Zusammenfassung

Ein kombiniertes Erd-Sternsensormsystem (1) zur dreiachsigen Lagebestimmung von Satelliten im Weltraum hat getrennte Aperturen mit unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen und gemeinsame Bildaufnehmer (4) für den Erd- und den Sternsensor. Es kann eine gemeinsame Optik (2) für die Erd- und Sternbeobachtung und ein Ablenkspiegel (3) zur Umleitung des seitlich eintretenden Erdlichts auf die gemeinsame Optik (2) vorgesehen sein. In einer Fokalebene befindet sich ein Fokalebenensensor mit einem Array von Bildaufnehmern (4), wobei die Integrationszeit steuerbar ist. Eine Auswerteeinheit ermittelt aus der Position und Bewegung der Sterne und des Erdrandes in der Fokalebene Bahn und Lage des Raumflugkörpers.

Fig. 1



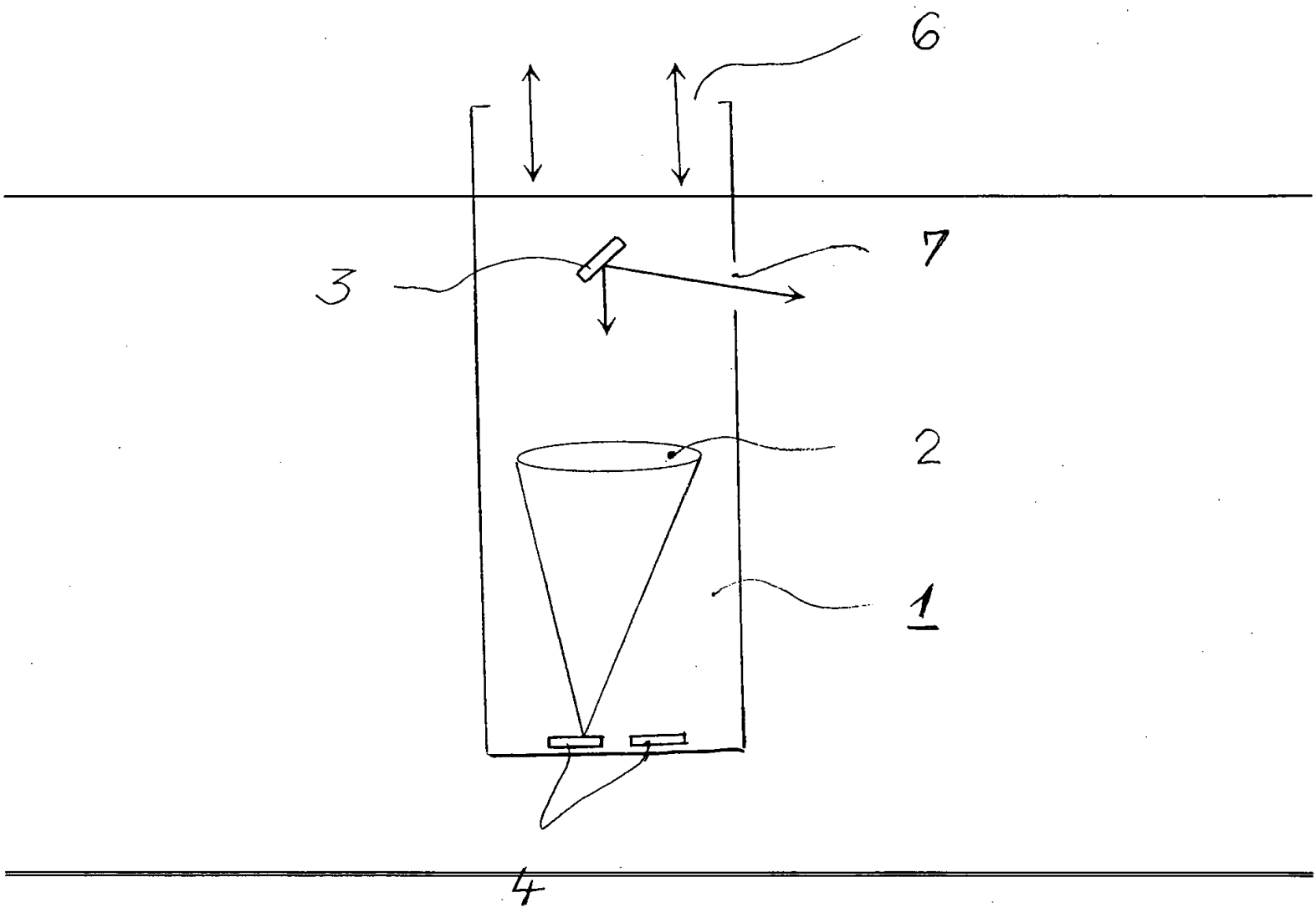


Fig. 1

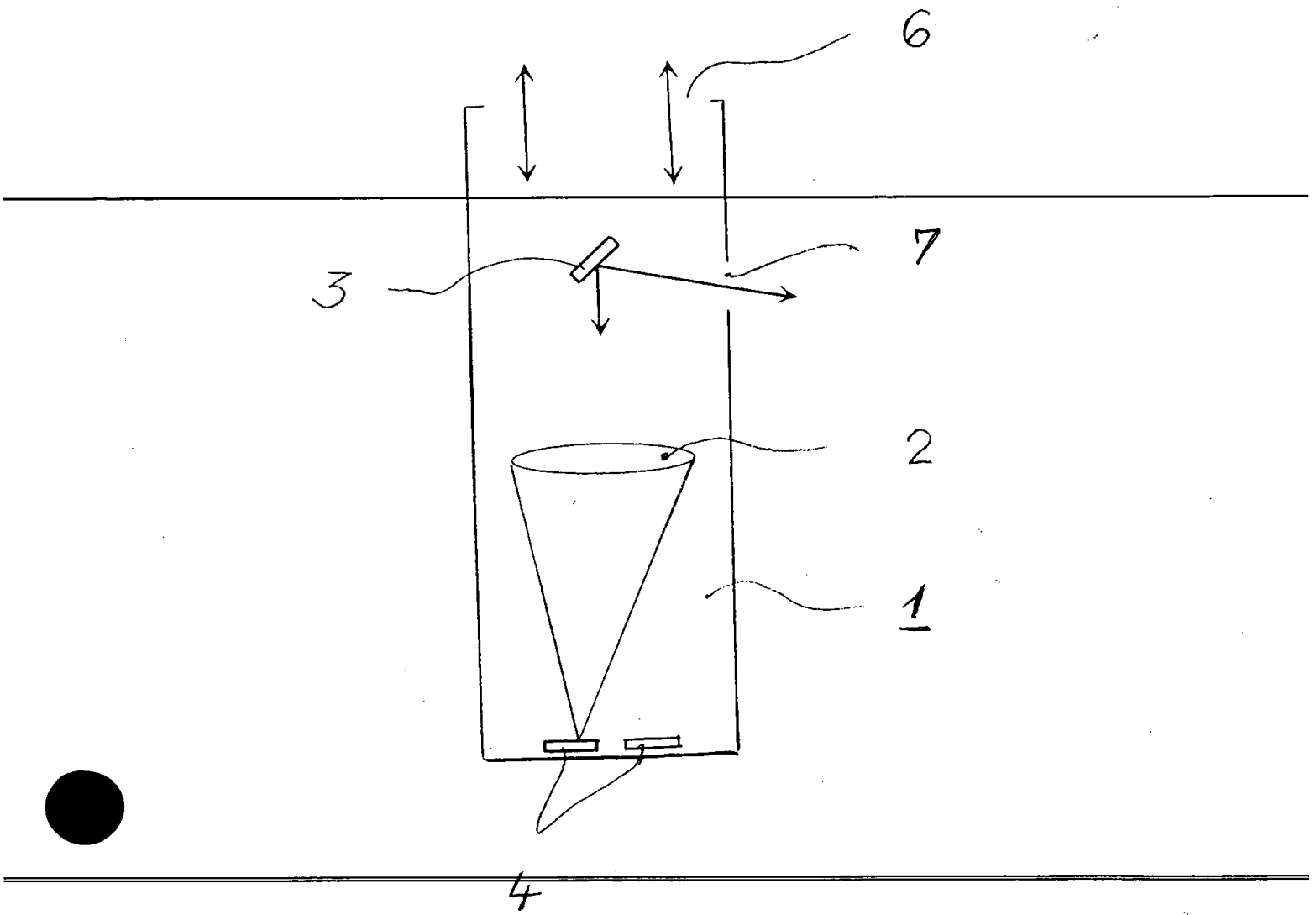


Fig. 1

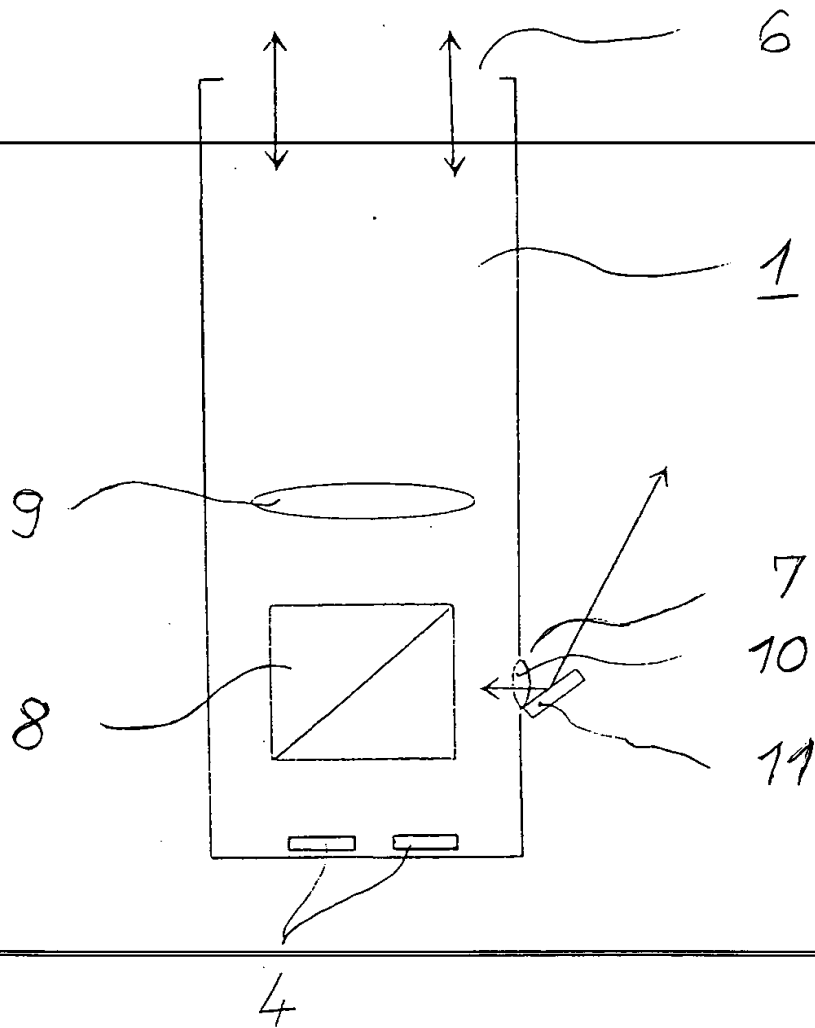


Fig. 2

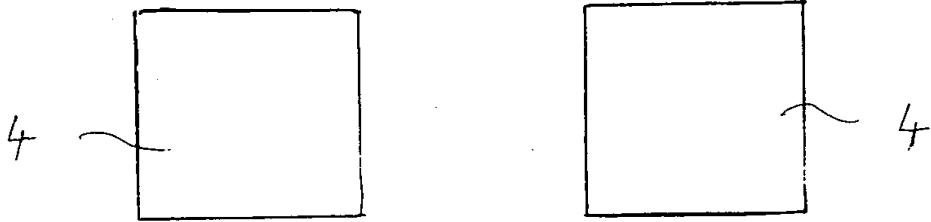
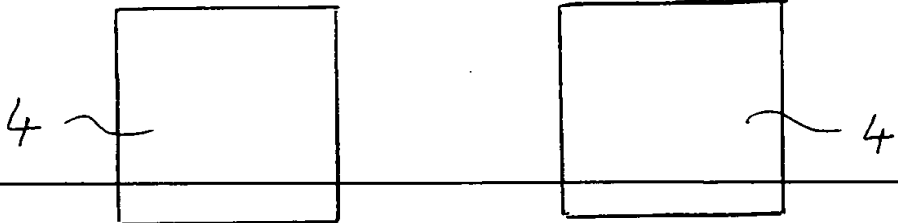


Fig. 3

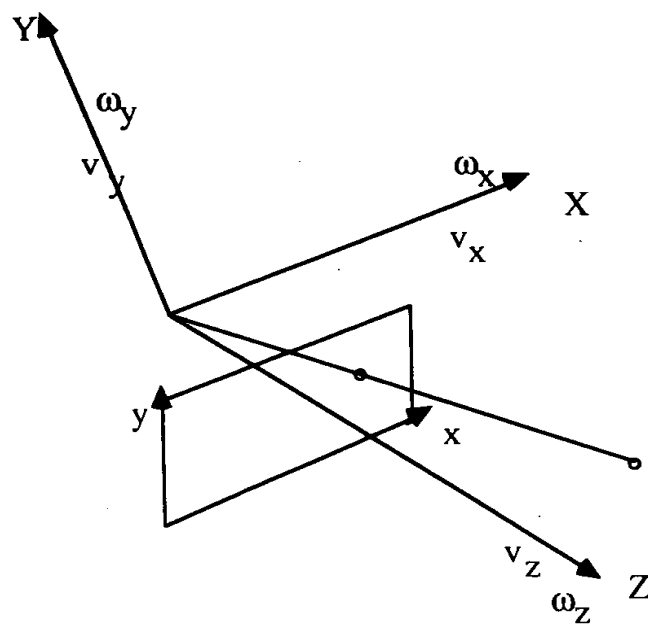


Fig. 4